

*Х. Ван<sup>1</sup>, П. Ли<sup>1</sup>, Ю. Сюэ<sup>2</sup>, М. В. Коровкин<sup>2</sup>*

## ПОСТРОЕНИЕ МАРШРУТА С ПОМОЩЬЮ УЛУЧШЕННОГО МЕТОДА ИЗОХРОН ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ПЛАВАНИЯ И С УЧЕТОМ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

<sup>1</sup> Институт электронной науки и техники, Цзилиньский университет,  
Китайская Народная Республика, 130012, Цзилинь, Чанчунь, пр. Чаньцзинь, 2699

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Теория оптимального управления является основой современной теории управления. Ее развитие зависит от требований со стороны объекта управления. С развитием науки и технологий теория оптимального управления стала широко применяться в различных областях, например в задачах оптимального быстрогодействия, с требованием минимальных расходов ресурсов, в задачах линейноквадратичного управления и т. д. В данной работе представлен вычислительный метод для построения оптимального маршрута, обеспечивающего минимальное время плавания с использованием линий румба и метода изохрон. Первоначально строится математическая модель оптимального маршрута и проводится дискретизация по времени для уравнений вычисления местоположения судна. Затем маршрут разрезается по большому кругу от начальной точки до конечной по определенным отрезкам времени, в результате чего создается набор линий румба. При этом каждая изохронная линия соответствует своему отрезку румба. Далее по обе стороны от  $N$  отрезков постоянного курса прокладываются параллельные линии с расстоянием  $\Delta D$ , таким образом создаются  $2N$  субканалов. Для того чтобы оптимальное решение было найдено как можно быстрее, рассмотрение движения судна ограничивается в пределах  $2N \times \Delta D$ . Между тем в промежутках дискретного времени начальный курс судна остается постоянным и равным соответствующему направлению линии румба. При выборе наилучших позиций судна в каждом субканале определим одну оптимальную изохрону. По достижении изохроной заданной окрестности точки назначения  $B$  судно направляется по линии румба непосредственно в  $B$ . После расчета минимального времени движения судна получим оптимальный маршрут рекурсивной последовательностью. Кроме того, для расширения возможностей обхода препятствий для улучшенного метода изохрон в статье предлагается алгоритм обхода препятствий на основе битовых карт, который позволяет избегать опасных зон во время плавания. Наконец, улучшенный метод изохрон применен для решения задачи построения оптимального по времени маршрута при неблагоприятных погодных условиях, таких как волнение и ветер. По результатам моделирования с использованием среды MATLAB показано, что с помощью этого алгоритма можно построить не только оптимальный по времени, но и относительно короткий по расстоянию маршрут и одновременно избежать опасных зон для обеспечения безопасности плавания. Библиогр. 16 назв. Ил. 9.

*Ключевые слова:* улучшенный метод изохрон, метеорологическая навигация, оптимизация маршрутов, алгоритм обхода препятствий.

---

*Ван Хунбо* — аспирант, доцент; wang\_hongbo@jlu.edu.cn

*Ли Пэнфэй* — магистр; pfi16@mails.jlu.edu.cn

*Сюэ Юаньюань* — аспирант; amocoi@163.com

*Коровкин Максим Васильевич* — кандидат физико-математических наук, доцент; maxik@vrm.apmath.spbu.ru

*Wang Hongbo* — postgraduate student, associate professor; wang\_hongbo@jlu.edu.cn

*Li Pengfei* — master; pfi16@mails.jlu.edu.cn

*Xue Yuanjuan* — postgraduate student; amocoi@163.com

*Korovkin Maxim Vasilievich* — PhD of physical and mathematical sciences, associate professor; maxik@vrm.apmath.spbu.ru

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2017

## APPLICATION OF IMPROVED ISOCHRON METHOD IN SHIP'S MINIMUM VOYAGE TIME WEATHER ROUTING

<sup>1</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,  
College of Electronic Science and Engineering, Jilin University,  
2699, pr. Qianjindajie, Changchun, 130012, Chinese Peoples Republic

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg,  
199034, Russian Federation

Optimal control theory is the core of modern control theory. The development of control theory comes from the requirements of the control object. With the continuous progress of social science and technology, optimal control theory is widely used for such issues as the minimum time problem, the minimum energy consumption problem, the linear quadratic index optimal problem, and others. In this paper, a method of calculating the minimum time route of the ship using rhumb lines combined with isochrones is proposed. Firstly, a mathematical model of the minimum time route is constructed and the ship motion equation is discretized. Secondly, the distance between the starting point and the end point is divided into several rhumb segments with equal traveling time so that each isochrone corresponds to different rhumb line. Then,  $N$  parallel lines of equal spacing  $\Delta D$  are arranged on both sides of each rhumb segment to form  $2N$  sub-channels. Stipulate that the ship can only sail within the interval of  $2N \times \Delta D$  and constrain the navigation area in order to find the optimal solution faster. At each unit of discrete time the course of the ship remains constant. Select the optimal arrival points on each sub-lane interval in the same time to form the local optimal isochrone. After calculating the minimum time of the ship's voyage, the minimum time route is derived using step-by-step recursion. In addition, in order to improve the obstacle avoidance capability of the improved isochrone method, the paper also proposes the algorithm based on a bitmap image in order to avoid a danger zone which may be encountered in the course of navigation, so as to ensure the safe navigation of the ship at sea. Finally, the improved isochrone method is applied to the problem of the minimum time route of the ship under meteorological conditions. The simulation results in MATLAB show that the algorithm can not only find the minimum time route from the starting point to the end point and ensure the route is relatively short, but also avoid dangerous areas encountered in the course of navigation in time and assure safety of navigation. Refs 16. Figs 9.

*Keywords:* improved isochrone method, meteorological navigation, route optimization, algorithm of avoiding the danger zone.

**1. Введение.** В задачах построения маршрута безопасность и экономичность являются двумя важными факторами. Метеорологическая информация об условиях плавания судна служит основой для проложения оптимального маршрута при неблагоприятной погоде. Маршрут будет оптимальным с обеспечением безопасности плавания, если будут выполнены определенные требования, такие как минимальное время в пути, минимальный расход топлива, минимальное повреждение груза, повреждение самого судна или других судов и т. д. В настоящее время проложение кратчайшего по времени маршрута и с учетом данных прогноза погоды важно с точки зрения сокращения экономических затрат. Поэтому проведение исследований по оптимизации маршрута по указанным критериям крайне актуально в метеорологической навигации.

В последнее время представлены различные методы проложения маршрутов трансокеанских судов, оптимальных по критерию минимального времени плавания. В целом эти методы могут быть разделены на две категории: классические и интеллектуальные. Первые включают методы изохрон [1–3], вариационные [4–6] и методы динамического программирования [7, 8]; вторые — генетический алгоритм [9, 10], муравьиный алгоритм [11] и графический метод в трехмерном пространстве [12].

Метод изохрон, предложенный в 1957 г. [1], имеет целью построение маршрута с минимальным временем плавания с учетом данных прогноза погоды. Однако в силу

проблемы возникновения изохронных циклов, связанной с невыпуклостью профилей скорости судна в зависимости от погодных условий, его применение не допускает использования современных вычислительных систем. Алгоритм построения маршрутов на основе вариационного исчисления корректен в плане математики, но на практике для его внедрения нужно решить еще много проблем. Алгоритм динамического программирования имеет достаточную эффективность и гибкость для практического применения. Тем не менее известная проблема «проклятия размерности» не допускает рассматривать на его основе практические задачи построения маршрутов с разумными вычислительными затратами при необходимости постоянного пересчета решения с поступлением уточненной информации о погодных данных [13]. Новые интеллектуальные алгоритмы построения маршрутов в настоящее время находятся только в стадии разработки, и возможности их внедрения еще предстоит проверить.

В сравнении с вышеуказанными методами улучшенный метод изохрон, описанный в данной статье, допускает простую реализацию и при этом предъявляет небольшие требования к вычислительным ресурсам. Хотя метод изохрон и является классическим, но до сих пор один из наиболее предпочтительных для выбора первоначального маршрута, последующего его изменения и автоматической навигации с учетом погодных условий.

В статье описан метод расчета оптимального по критерию минимального времени маршрута с использованием изохронной линии и линий румба. Сначала проводится разделение (дискретизация) маршрута по дуге большого круга на несколько участков с постоянным значением курсового угла (линия румба). Каждая изохронная линия соответствует одному отрезку линии румба. Формально, в непрерывном случае изохроны представляют собой огибающие семейства линий, определяемых конечными точками дуг постоянного направления, имеющих начало на изохроне, построенной на предыдущем этапе, и проходимых судном за фиксированный промежуток времени. Для обеспечения эффективной реализации осуществляется дискретизация пространства. Строятся  $N$  линий, параллельных отрезкам постоянного направления маршрута большого круга с шагом расстояния  $\Delta D$  по обе стороны от них. Таким образом, вдоль исходного маршрута формируются  $2N$  полос или субканалов. После получения на каждом отрезке дискретного времени оптимального положения судна в каждой полосе оно используется для порождения дуг постоянного направления с заданным шагом по углу курса для фиксированного промежутка времени, что позволяет сформировать следующую изохронную линию. В итоге определяются время плавания и оптимальный маршрут. Процесс реализации улучшенного метода изохрон будет подробно приведен в п. 2, в том числе с учетом возможного прохождения генерируемого маршрута в обход опасных зон. Для этого приведены алгоритм обхода препятствий на основе растровых изображений, а также результаты моделирования построения оптимального по времени маршрута с учетом прогноза погоды.

## **2. Применение усовершенствованного способа изохрон.**

**2.1. Теоретические основы.** Как показано на рис. 1, для выбранных начальной и конечной точек  $A$  и  $B$  разделим маршрут по большому кругу между этими точками на  $F$  отрезков. Начиная с точки  $A$ , с помощью метода изохрон вычислим базовые точки, которые лежат на первой изохронной линии. Примем данные точки за начальные для второго шага итерации. В отличие от других методов улучшенный метод изохрон, приведенный в статье, для ограничения количества изохронных линий в разумных пределах фиксирует  $N$  линий по обе стороны от отрезков на расстояниях с шагом  $\Delta D$ . Таким образом получим  $2N$  субканалов для ограничения области

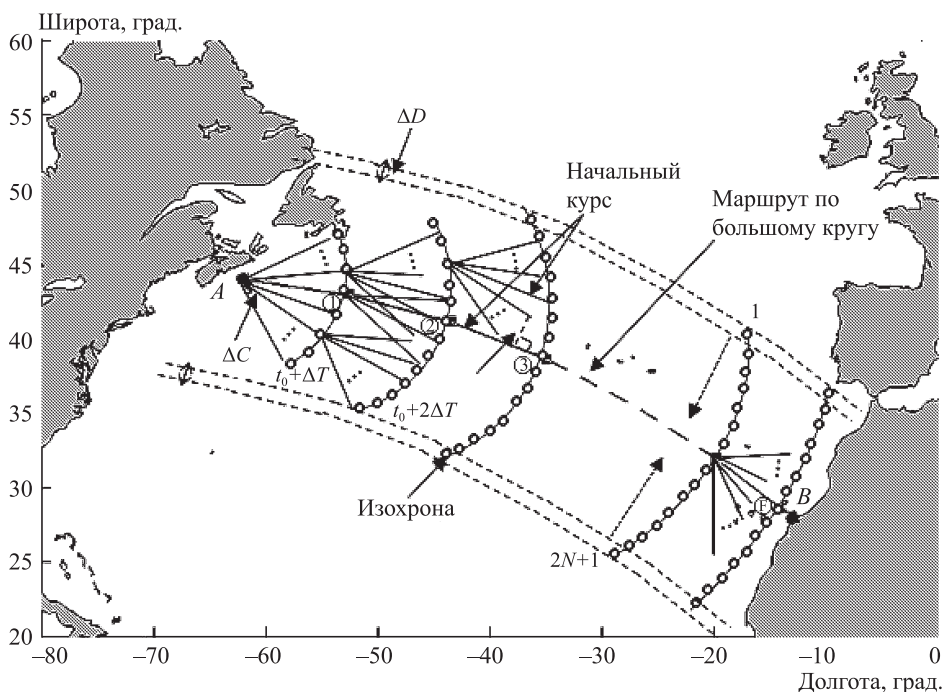


Рис. 1. Иллюстрация улучшенного метода изохрон

плавания. Объем вычислений и точность связаны с выбором значений  $\Delta D$  и  $N$ . Каждая изохронная линия однозначно соответствует основному отрезку. Далее проведем построение маршрута методом изохрон на каждом промежутке дискретного времени  $\Delta t_i$  и вычислим для каждого участка маршрута расстояние между локальной конечной точкой и основным отрезком, чтобы определить, какому субканалу принадлежит конечная точка. Затем по каждому субканалу рассчитаем расстояния между каждой локальной конечной точкой и конечной точкой по большому кругу и выберем минимальное из них значение, которое укажет оптимальную точку в каждом субканале. На основе полученных результатов аналогичным образом проведем следующий шаг, пока не достигнем окрестности конечной точки. Далее найдем минимальное время по отрезкам и просуммируем  $\Delta t_i$  по  $F$  отрезкам. В результате имеем минимальное время плавания и, опираясь на предыдущие шаги, восстановим оптимальный маршрут.

Для установления местоположения судна в географической системе координат проведем дискретизацию по времени для уравнений вычисления местоположения [14]:

$$\lambda_{f+1}(i, j) = \lambda_f(i) + \frac{(V_{(i, j)} \cdot \Delta T \cdot \sin(\theta_{(i, j)}))}{Perj}, \quad (1)$$

$$\varphi_{f+1}(i, j) = \varphi_f(i) + \frac{(V_{(i, j)} \cdot \Delta T \cdot \cos(\theta_{(i, j)}))}{Perw}. \quad (2)$$

В (1) и (2)  $\lambda$ ,  $\varphi$  — долгота и широта соответственно, с помощью которых определяется положение движущегося судна;  $\lambda_f(i)$ ,  $\varphi_f(i)$  — долгота и широта  $i$ -й точки на  $f$ -й изохронной линии,  $i \in [1, 2N]$ ,  $f \in [1, F]$ ;  $\lambda_{f+1}(i, j)$ ,  $\varphi_{f+1}(i, j)$  — долгота и широта  $j$ -го местоположения судна от  $i$ -й точки на  $f$ -й изохронной линии;  $\theta(i, j)$  — направление на  $j$ -м участке маршрута от  $i$ -й точки на  $f$ -й изохронной линии;  $V(i, j)$  —

скорость на  $j$ -м участке маршрута от  $i$ -й точки на  $f$ -й изохронной линии, зависящая от внешних факторов, таких как ветер, волна и т. д.;  $\Delta T$  — шаг дискретного времени;  $Perw$  — длина  $1^\circ$  меридиана (расстояние по меридиану между отстоящими друг от друга на  $1^\circ$  параллелями). При рассмотрении Земли как обычного шара длины всех меридианов равны и  $Perw \approx 111$  км;  $Perj$  — длина  $1^\circ$  параллели (расстояние по параллели между отстоящими друг от друга на  $1^\circ$  меридианами):

$$Perj = Perw \cdot \cos \varphi.$$

С использованием улучшенных правил выбора местоположения изохронной линии на участке области плавания из множества местоположений  $(\lambda_{f+1}(i, j), \varphi_{f+1}(i, j))$  определим наилучшие точки в каждом субканале и получим  $(f + 1)$ -ю изохронную линию с географическими координатами  $\lambda_{f+1}(i)$  и  $\varphi_{f+1}(i)$ .

На проекции Меркатора для отрезков линий румба, являющихся прямыми линиями, выполняется следующее уравнение:

$$\lambda_{f+1} - \lambda_f = \tan \psi \cdot \left( \ln \left( \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{f+1}}{2} \right) \right) - \ln \left( \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right) \right) \right),$$

где  $\lambda_f, \varphi_f, \lambda_{f+1}, \varphi_{f+1}$  — долгота и широта начальной и конечной точек отрезка линии румба;  $\psi$  — угол курса на отрезке.

Таким образом, получим выражения для всех отрезков дискретизации маршрута.

Под влиянием ветра и волнения при неизменных оборотах гребного винта и мощности двигателя скорость судна уменьшается по сравнению с движением на тихой воде и при безветрии. Этот факт будем называть естественным торможением, или естественной потерей скорости. Для того чтобы установить фактическую скорость судна во время плавания, следует определить эту потерю. Можно использовать следующую эмпирическую формулу [15]:

$$V = V_0 - (0.745h - 0.257qh)(1.0 - 1.35 \cdot 10^{-6}DV_0), \quad (3)$$

здесь  $V$  — фактическая скорость судна (в узлах);  $V_0$  — скорость судна на тихой воде (в узлах);  $h$  — высота волны (в м);  $q$  — угол встречи с волной (в град.);  $D$  — водоизмещение (в т).

Формула (3) применима для судов с водоизмещением 5000–25 000 т при скорости хода от 9 до 20 узлов и высоте волны не более 5 м. Исследования показали, что в случае, когда высота волны не превышает 5 м, погрешность определения скорости составляет около  $\pm 1$  узла.

Кроме естественной потери скорости при сильном волнении и ветре, под воздействием волн могут возникать слемминг, заливание верхней палубы и оголение винта. Это может привести к повреждениям корпуса, винта и снижению безопасности. Для того чтобы избежать таких опасных явлений, следует ограничивать скорость судна. Будем называть это искусственным торможением, или искусственной потерей скорости. Определение допустимой максимальной скорости для обеспечения безопасности плавания судов является важной задачей. Существуют различные способы для расчета ограничения скорости, например метод Льюиса, метод Аэртсена, метод Хосода [16] и др. Так, японский ученый Хосода провел экспериментальные исследования для контейнеровоза. В результате была получена формула для вычисления ограничения скорости судна при волнении

$$V_{\text{Limit}} = \exp\{0.13 \cdot [\mu(q) - h]^{1.6}\} + r(q), \quad (4)$$

в которой  $\mu(q) = 12.0 + 1.4 \cdot 10^{-4}q^{2.3}$ ;  $r(q) = 7.0 + 4.0 \cdot 10^{-4}q^{2.3}$ ;  $q$  — угол встречи с волной (в град.);  $h$  — высота волны (в м).

В формуле (4) хорошо видна связь между ограничением скорости судна и различными условиями воздействия волнения на судно. При построении маршрута с минимальным временем прохождения с учетом волнового воздействия ограничим максимальную скорость найденным по (4) значением на участках с волнением.

**2.2. Описание алгоритма.** Определение маршрута с минимальным временем прохождения с использованием улучшенного метода изохрон можно разделить на следующие шаги.

1. Пусть в момент  $t_0$  судно начинает двигаться от начальной точки  $A$  в соответствии с углом курса

$$\theta(i) = \theta_0(1) - (m + 1 - i) \cdot \Delta C, \quad i \in [1, 2m + 1],$$

где  $\theta_0(1)$  — начальный курс по дуге большого круга для первой изохронной линии;  $\Delta C$  — приращение курса;  $2m + 1$  — количество маршрутов.

Построим  $2m + 1$  лучей по обе стороны маршрута под углом  $\Delta C$ .

Через промежуток времени  $\Delta T$  соединим все точки местоположения судна и получим первую изохронную линию. С помощью уравнения движения судна можно определить географические координаты каждой точки и сохранить их во множестве  $\{\lambda_1(i), \varphi_1(i)\}$ .

2. Для каждой точки на первой изохронной линии построим  $2m + 1$  маршрутов с начальным курсом

$$\theta(i, j) = \theta_0(2) - (m + 1 - j) \cdot \Delta C, \quad i, j \in [1, 2m + 1],$$

где  $\theta_0(2)$  — курс от каждой точки на первой изохронной линии до конечного пункта назначения по большому кругу. Через промежуток времени  $\Delta T$  для каждого курса получим пройденный путь  $L(i, j)$  и географические координаты точек  $\{\lambda(i, j), \varphi(i, j)\}$ . Введем переменную  $Dist$  для обозначения расстояния от местоположения судна до основного маршрута (рис. 2);  $X_1, X_2$  — начальная и конечная точки линии румба,

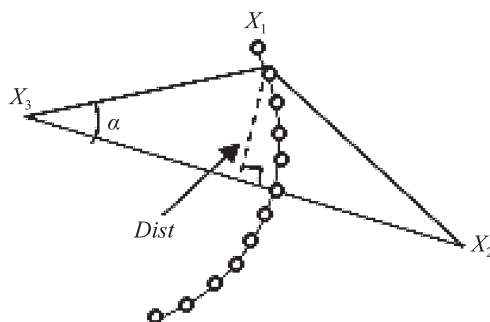


Рис. 2. Определение расстояния до основного маршрута

$X_3$  — произвольная точка, в которой в данный момент находится судно. Используя формулы векторной алгебры, определим значение  $Dist$ :

$$\cos \alpha = \frac{\overrightarrow{X_1 X_3} \cdot \overrightarrow{X_1 X_2}}{|\overrightarrow{X_1 X_3}| \cdot |\overrightarrow{X_1 X_2}|},$$



$$Dist = |\overrightarrow{X_1 X_3}| \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

В соответствии с формулой (5) установим  $Dist(i, j)$  для каждого местоположения судна по лучам от точек на первой изохронной линии и уточним порядок  $k$  в  $2N$  субканалах:

$$k = N + 1 - \left\lceil \frac{Dist(i, j)}{\Delta D} \right\rceil. \quad (6)$$

Вычислим расстояния от всех точек в  $k$ -м субканале до точки назначения, выберем из них самую близкую и создадим вторую изохронную линию  $\{\lambda_2(k), \varphi_2(k)\}$ ,  $k \in [1, 2N]$ , соблюдая условие  $|Dist(i, j)| \leq N \cdot \Delta D$ , чтобы местоположение не вышло из зоны плавания:

$$Num_f = (2m + 1) \cdot (i - 1) + j,$$

здесь  $i$  — порядок местоположения судна на  $(f-1)$ -й изохронной линии,  $i \in [1, 2m+1]$ ;  $Num_f$  — номер  $j$ -го местоположения судна от  $i$ -й точки на  $(f-1)$ -й изохронной линии.

3. Повторяя шаг 2, вычислим изохронные линии  $\{\lambda_3(k), \varphi_3(k)\}$ ,  $\{\lambda_4(k), \varphi_4(k)\}$ , ...,  $\{\lambda_F(k), \varphi_F(k)\}$ ,  $k \in [1, 2N]$ , во времени  $t_0 + 3\Delta T$ ,  $t_0 + 4\Delta T$ , ...,  $t_0 + F\Delta T$ .

4. При достижении на  $F$ -м шаге точек на изохроне, лежащих в заданной окрестности точки назначения  $B$ , сформируем дугу маршрута постоянного курса, соединяющую точку  $\{\lambda_F(K_F), \varphi_F(K_F)\}$  на изохроне и точку  $B$ . Найдем номер  $K_F$  и точку  $\{\lambda_F(K_F), \varphi_F(K_F)\}$  на  $F$ -й изохроне, обеспечивающую минимальное время прохождения последнего отрезка пути. Таким образом рассчитаем общее кратчайшее время плавания:

$$T_{\min} = F \cdot \Delta T + t_{\min}(k).$$

5. В соответствии с номерами  $Num_f$  сохраненных местоположений на каждой из изохронных линий найдем номер  $K_{F-1}$  и местоположение  $\{\lambda_{F-1}(K_{F-1}), \varphi_{F-1}(K_{F-1})\}$ , которое является местоположением, установленным на предыдущем шаге  $\{\lambda_F(K_F), \varphi_F(K_F)\}$ . Вычисляя далее аналогичным образом, получим географические координаты  $\{\lambda_f(K_f), \varphi_f(K_f)\}$  на  $f$ -й изохронной линии. В результате сформируем маршрут с кратчайшим временем прохождения:

$\{B, \{\lambda_F(K_F), \varphi_F(K_F)\}, \dots, \{\lambda_f(K_f), \varphi_f(K_f)\}, \dots, \{\lambda_1(K_1), \varphi_1(K_1)\}, A\}$ ,  $k \in [1, 2N]$ ,

$$K_f = \left\lceil \frac{Num_f}{2m + 1} \right\rceil.$$

**2.3. Алгоритм обхода препятствий на основе использования битовых карт.** В процессе построения необходимо избегать пересечений маршрута с опасными зонами. В качестве факторов, от которых зависит их конфигурация, можно рассматривать ветер, волнение и другие воздействия с параметрами, превышающими значения, определенные для конкретных задач. В данной работе предложен способ обхода препятствий на основе использования битовых карт, удобный для применения совместно с методом изохрон.

Информация об опасных областях вдоль маршрута плавания может быть представлена в виде битовой карты с высоким разрешением, наложенной на всю рассматриваемую область плавания. Каждая ячейка карты, лежащая в опасной зоне, обозначается как «1», а остальные как «0». Это позволяет достаточно эффективно проверять допустимость того или иного участка траектории, однако требует предварительного построения раstra для всей зоны плавания. Когда судно перемещается

к следующей точке, нужно определить, не находится ли целевая точка в опасной зоне. Если она попадает в опасную зону, то требуется найти другую точку для замены. Выбор точки для замены является ключевым вопросом.

Рассмотрим маршрут  $S - G$ , как показано на рис. 3. Точка  $S$  является предыдущей по отношению к точке  $G$ , которая находится в опасной зоне. Необходимо найти точку  $G'$  на отрезке  $S - G$ , не лежащую в опасной зоне. Для того чтобы маршрут не был сильно изменен, выбранная точка должна быть недалеко от точки  $G$ . Подробная схема алгоритма для выбора точки замены показана на рис. 4.

В алгоритме обхода препятствий дискретный интервал времени  $\Delta T$  делится на  $P$  частей с интервалом  $\Delta T'$ . В первом цикле продвигаемся в течение времени  $\Delta T'$  по направлению  $S - G$ , определяем координаты вновь достигнутой точки, которую обозначим  $Q$ . Далее выявляем, попадает ли эта точка в опасную зону. Если нет, то продолжаем движение; если да — то завершаем цикл, обозначив точку  $G'$  за  $Q$ .

После нахождения точки  $G'$  во втором цикле рассмотрим для нее по обе стороны от исходного курса  $2m$  дуг маршрута с шагом  $\Delta C$  по курсу и продолжим движение на промежуток времени  $(P - i) \cdot \Delta T'$ . Среди конечных точек полученных дуг выберем ту, которая не попадает ни в одну из запретных областей и расстояние от которой до конечной точки маршрута будет минимальным. Обозначим ее как  $G''$ . Получим новый маршрут  $S - G' - G''$

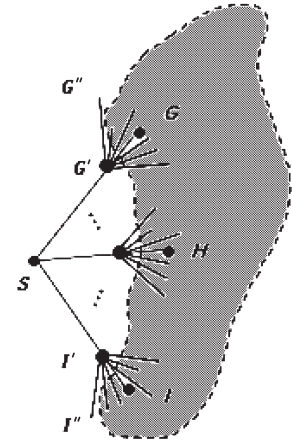


Рис. 3. Иллюстрация обхода препятствий на основе использования растровых изображений

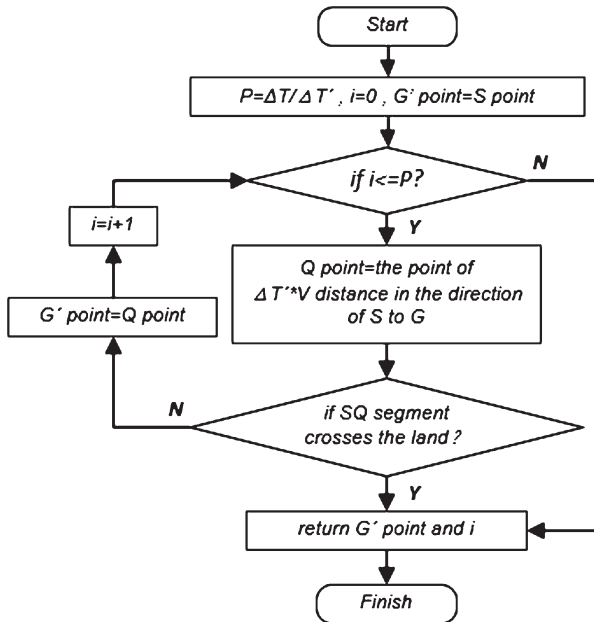


Рис. 4. Схема алгоритма обхода препятствий



для обхода препятствия вместо исходного  $S - G$ . Следует отметить, что если все отрезки маршрута из второго цикла, порождаемые от одной точки, попадают в опасную зону (как точка на рис. 3), то такой вариант маршрута исключается из рассмотрения.

**3. Исходные данные для моделирования.** В работе использовались метеорологические данные, заданные на координатной сетке, представляющей собой граф со множеством узлов  $N$  и множеством ребер  $M$ . Пространственное разрешение координатной сетки может быть  $0.25^\circ \times 0.25^\circ, 0.5^\circ \times 0.5^\circ, 1^\circ \times 1^\circ, 2^\circ \times 2^\circ$  и т. д., при этом чем выше точность пространственного разрешения, тем больше объем данных. Полученные данные от ресурса The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (см. URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>) предоставляют информацию о ветре, ветровом волнении и зыби, направлении бега волны, скорости и направлении ветра. В соответствии с заданной начальной точкой и точкой назначения область моделирования можно ограничить прямоугольником с длиной стороны  $a$  и шириной  $b$ . Нами для моделирования построения маршрута с минимальным временем прохождения был выбран следующий район плавания: от  $20$  до  $60^\circ$  северной широты, от  $80$  до  $0^\circ$  западной долготы. Разрешение сеток составляло  $1^\circ \times 1^\circ$ , соответственно получится 3321 узел. Все узлы пронумерованы, как показано на рис. 5. Для каждого узла имеется своя соответствующая информация о погоде. Точки  $A$  и  $B$  являются соответственно начальной и конечной для

1	42		698	739		1600	1641		2707	2748		3240	3281
2	43		699	740		1601	1642		2708	2749		3241	3282
		...			...			...			...		
16	57		713	754		1615	1656		2722	2763		3255	3296
17	58		714	755		1616	1657		2723	2764		3256	3297
18	59		715	756		1617	1658		2724	2765		3257	3298
		...			...			...			...		
32	73		729	770		1631	1672		2738	2779		3271	3312
33	74		730	771		1632	1673		2739	2780		3272	3313
34	75		731	772		1633	1674		2740	2781		3273	3314
		...			...			...			...		
40	81		737	778		1639	1680		2746	2787		3279	3320
41	82		738	779		1640	1681		2747	2788		3280	3321

Рис. 5. Нумерация узлов

построения маршрута. Широта и долгота узлов сетки по соответствующему номеру определяются следующим образом:

$$N = (\text{Length} + \lambda) \cdot \text{Width} + \varphi_{top} - \varphi,$$

$$\lambda = \left\lfloor \frac{N}{\text{Width}} \right\rfloor - \text{Length},$$

$$\varphi = \varphi_{top} - (N \% \text{Width}),$$

где величины  $\text{Width} = 41$ ,  $\text{Length} = 80$ ,  $\varphi_{top} = 61^\circ$ ;  $N$  — номер узла сетки,  $\lambda$  и  $\varphi$  — географические координаты.

Во время плавания маршрут судна необязательно должен проходить строго по узлам сетки. В таком случае данные о погоде вычисляются с помощью билинейного

алгоритма интерполяции. Положим, что  $(\lambda + \omega, \varphi + v)$  — положение судна в географических координатах точки, для которых  $\lambda, \varphi$  являются целой частью значения координат с плавающей точкой;  $\omega, v$  — дробная часть значения координат с плавающей точкой в интервале  $[0, 1)$ . Тогда информацию о погоде для данной точки можно получить по четырем узлам сетки  $\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \vec{\xi}_3, \vec{\xi}_4$  вокруг нее:

$$\vec{\xi} = (1 - \omega)(1 - v)\vec{\xi}_1 + (1 - \omega)v\vec{\xi}_2 + \omega(1 - v)\vec{\xi}_3 + \omega v\vec{\xi}_4.$$

**4. Моделирование улучшенного метода изохрон с использованием погодных условий.** На основе исследования по улучшенному методу изохрон была разработана программа для проведения маршрута с минимальным временем прохождения и осуществлено имитационное построение маршрута с учетом погодных условий. Для этого использована модель контейнеровоза, который имеет следующие физические характеристики: водоизмещение — 20 000 т, длина — 185.0 м, осадка с полной загрузкой — 11.4 м, скорость на тихой воде — 15 узлов. Выявлены опасные зоны с высотой волны более 5.5 м или ветром со скоростью более 16 м/с.

При моделировании оптимального маршрута с учетом погодных условий заданы географические координаты начальной  $[62^\circ\text{W}, 44^\circ\text{N}]$  и конечной  $[13^\circ\text{W}, 28^\circ\text{N}]$  точек маршрута. Расстояние между начальной и конечной точками по большому кругу составляет 2523.40 морских миль. Проведено моделирование с использованием метода изохрон для построения маршрута по критерию минимального времени плавания. Предположим, что судно покидает начальную точку 7 марта 2016 г. Морские метеорологические данные обновляются с интервалом времени  $\Delta T$ . На рис. 6 представлены опасные зоны на пятом шаге построения маршрута. Здесь темным цветом (1) обозна-

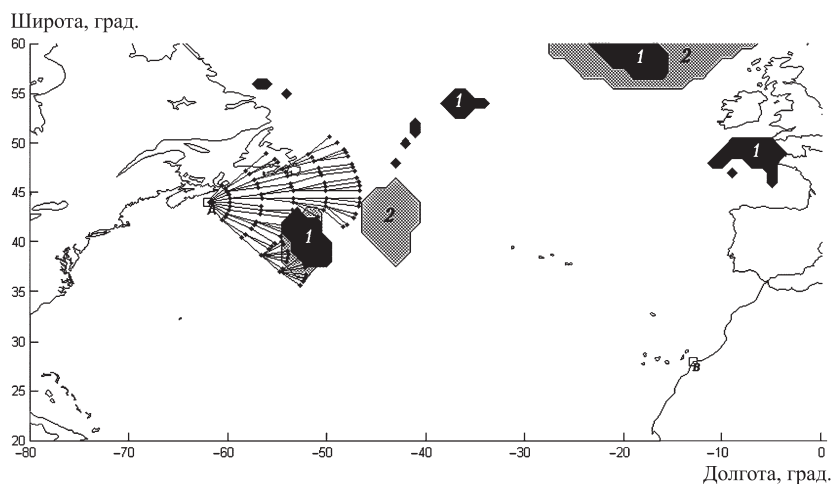


Рис. 6. Опасные зоны на пятом шаге построения маршрута

чены области, в которых скорость ветра больше 16 м/с, серым цветом (2) — области, где высота волны больше 5.5 м. В некоторый момент времени маршрут большого круга пройдет через опасную зону, в свою очередь, предлагаемый алгоритм позволяет своевременно избежать ее. Прибытие в точку назначения выполнено 14 марта 2016 г. Все полученные с помощью модифицированного метода изохрон маршруты показаны на рис. 7. Черная пунктирная линия представляет маршрут по большому кругу, а сплошная линия представляет собой выбранный из всех возможных маршрут,

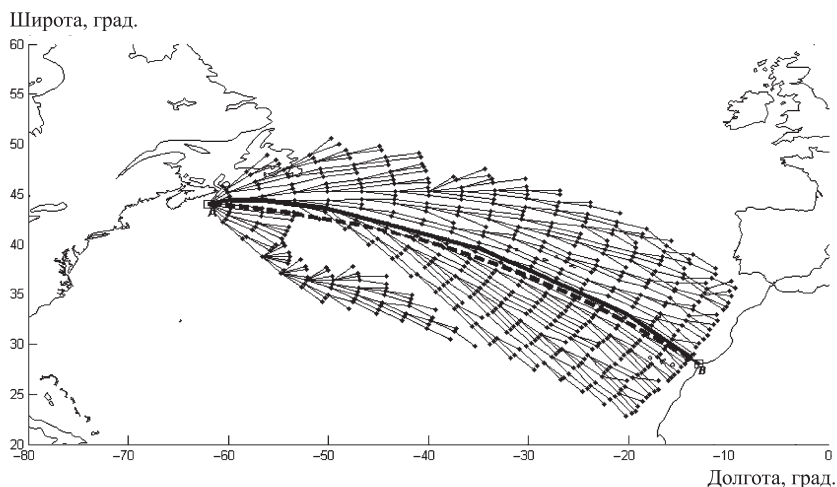


Рис. 7. Маршруты, полученные с помощью модифицированного метода изохрон

имеющий самое короткое время прохождения. Как видно из графика, маршрут, построенный с помощью метода изохрон, почти совпадает с маршрутом по большому кругу. Общая длина маршрута составляет 2554.40 морских миль, что лишь на 31.00 миль больше, чем по большому кругу. Общее время плавания — 165.87 ч, средняя скорость — около 15.39 узлов.

В переменных погодных условиях сравнение скоростей и высоты волнения, встречающегося по ходу движения судна, по двум маршрутам показано на рис. 8 и 9 соответственно.

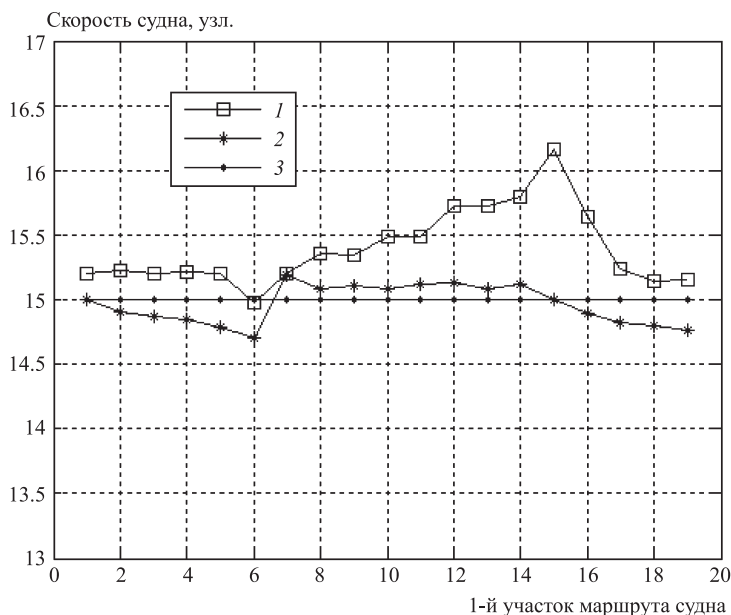


Рис. 8. Иллюстрация сравнения скорости судна при движении по оптимальному маршруту (1), маршруту по большому кругу (2) и скорости на тихой воде (3)

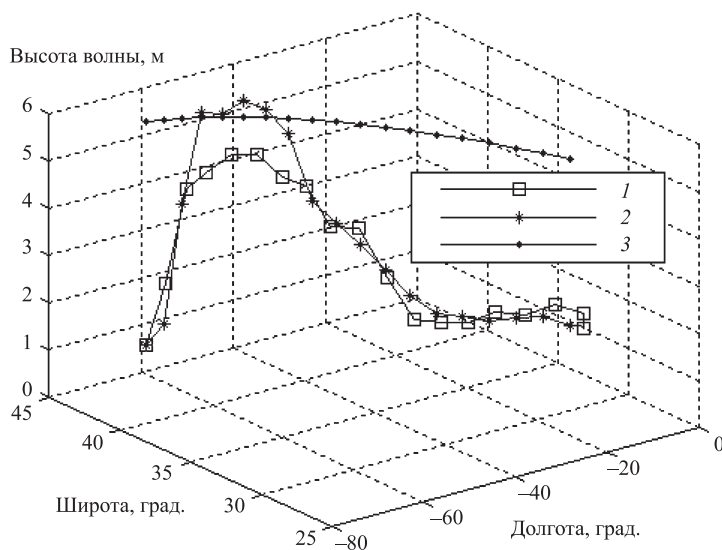


Рис. 9. Иллюстрация сравнения высот волн, соответствующих маршруту (1), маршруту по большому кругу (2) и маршруту при ограничении по условиям плавания (3)

Анализ результатов моделирования построения минимального по времени прохождения маршрута с помощью улучшенного метода изохрон позволяет сделать следующие выводы: при помощи алгоритма с использованием отрезков постоянного направления и изохронной линии для оптимизации маршрута по минимальному времени можно не только провести маршрут с кратчайшим временем прохождения, но и оперативно изменить курс для исключения влияния плохих погодных условий.

**5. Заключение.** Оптимальная маршрутизация судов с учетом погодных условий имеет большое практическое и экономическое значение для морского транспорта. Классический метод изохрон требует, во-первых, больших вычислительных ресурсов и, во-вторых, может приводить к заикливанию процедуры построения изохрон для наилучшего маршрута. В статье представлен улучшенный метод изохрон и рассмотрено его применение к решению проблемы маршрутизации судна с учетом погодных условий, а также построены алгоритм определения изохронных линий и алгоритм обхода препятствий (опасных зон). Для подтверждения эффективности метода проведено моделирование. Показано, что применение улучшенного метода изохрон с использованием учета динамически изменяющихся морских метеорологических условий является эффективным инструментом для построения относительно кратчайшего маршрута с соблюдением безопасности и экономии времени.

## Литература

1. James R. W. Application of wave forecast to marine navigation // Comparative Biochemistry & Physiology a comparative physiology. 1957. Vol. 43, N 1. P. 195–205.
2. Hagiwara Hideki, Spaans J. A. Practical weather routing of sail-assisted motor vessels // Journal of Navigation. 1987. Vol. 40, N 1. P. 96–119.
3. Hagiwara H. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels. PhD thesis. Delft: Delft University of Technology, 1989. 336 p.
4. Faulkner F. D. Numerical methods for determining optimum ship routes // Journal of the Institute of navigation. Winter 1963. Vol. 10, N 4. P. 351–367.

5. Bleick W. E., Faulkner F. D. Minimal-time ship routing // *Journal of Applied Meteorology*. 1965. Vol. 4, N 2. P. 217–221.
6. Bijlsma S. J. A computational method for the solution of optimal control problems in ship routing // *Journal of the Institute of navigation*. 2001. Vol. 48, N 3. P. 145–154.
7. Petrie G. L., Bongert K. J., Maclean W. M. A new approach to vessel weather routing and performance analysis // *Marine Technology*. 1984. Vol. 21. P. 19–41.
8. Motte R. H., Calvert S. On the selection of discrete grid systems for on-board micro-based weather routing // *The Journal of Navigation*. 1990. Vol. 43. P. 104–117.
9. Maki A., Akimoto Y., Nagata Y. et al. A new weather-routing system that accounts for ship stability based on a real-coded genetic algorithm // *Journal of Marine Science and Technology*. 2011. Vol. 16, N 3. P. 311–322.
10. Kang M. H., Choi H. R., Kim H. S. et al. Development of a maritime transportation planning support system for car carriers based on genetic algorithm // *Applied Intelligence*. 2012. Vol. 36, N 3. P. 585–604.
11. Tsou M. C., Cheng H. C. An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing // *Polish Maritime Research*. 2013. Vol. 20, N 3. P. 28–38.
12. Veremei E. I., Sotnikova M. V. Optimal routing based on weather forecast // *Intern. Journal of Open Information Technologies*. 2016. Vol. 4, N 3. P. 55–61.
13. Eskild Hege. Development of a method for weather routing of ships: master thesis. Norwegian: Norwegian University of science and technology, 2014. 143 p.
14. Liu Feng, Pang Fuwen. Calculation of minimum-time ship route using rhumb algorithm // *Journal of Dalian marine college*. February 1994. Vol. 20, N 1. P. 14–18.
15. Yang Zhenzhong, Liu Shiqi. Calculation of speed loss for ships operating at heavy sea // *Navigation of China*. 1990. Vol. 27, N 2. P. 35–40.
16. Kltazawa Takamune, Kuroi Masaaki. Critical speed of container ship in rough sea // *Journal of the Society of naval architects of Japan*. December 1975. N 138. P. 269–276.

**Для цитирования:** Ван Х., Лу П., Сюэ Ю., Коровкин М. В. Построение маршрута с помощью улучшенного метода изохрон при минимизации времени плавания и с учетом прогноза погоды // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2017. Т. 13. Вып. 3. С. 286–299. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2017.306

## References

1. James R.W. Application of wave forecast to marine navigation. *Comparative Biochemistry & Physiology a comparative physiology*, 1957, vol. 43, no. 1, pp. 195–205.
2. Hagiwara Hideki, Spaans J. A. Practical weather routing of sail-assisted motor vessels. *Journal of Navigation*, 1987, vol. 40, no. 1, pp. 96–119.
3. Hagiwara H. *Weather routing of (sail-assisted) motor vessels*. PhD thesis. Delft, Delft University of Technology, 1989, 336 p.
4. Faulkner F. D. Numerical methods for determining optimum ship routes. *Journal of the Institute of navigation*, Winter 1963, vol. 10, no. 4, pp. 351–367.
5. Bleick W. E., Faulkner F. D. Minimal-time ship routing. *Journal of Applied Meteorology*, 1965, vol. 4, no. 2, pp. 217–221.
6. Bijlsma S. J. A computational method for the solution of optimal control problems in ship routing. *Journal of the Institute of navigation*, 2001, vol. 48, no. 3, pp. 145–154.
7. Petrie G. L., Bongert K. J., Maclean W. M. A new approach to vessel weather routing and performance analysis. *Marine Technology*, 1984, vol. 21, pp. 19–41.
8. Motte R. H., Calvert S. On the selection of discrete grid systems for on-board micro-based weather routing. *The Journal of Navigation*, 1990, vol. 43, pp. 104–117.
9. Maki A., Akimoto Y., Nagata Y. et al. A new weather-routing system that accounts for ship stability based on a real-coded genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, vol. 16, no. 3, pp. 311–322.
10. Kang M. H., Choi H. R., Kim H. S. et al. Development of a maritime transportation planning support system for car carriers based on genetic algorithm. *Applied Intelligence*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 585–604.
11. Tsou M. C., Cheng H. C. An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing. *Polish Maritime Research*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 28–38.
12. Veremei E. I., Sotnikova M. V. Optimal routing based on weather forecast. *Intern. Journal of Open Information Technologies*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 55–61.

13. Eskild Hege. *Development of a method for weather routing of ships*. Master thesis. Norwegian, Norwegian University of science and technology, 2014, 143 p.
14. Liu Feng, Pang Fuwen. Calculation of minimum-time ship route using rhumb algorithm. *Journal of Dalian marine college*. February 1994, vol. 20, no. 1, pp. 14–18.
15. Yang Zhenzhong, Liu Shiqi. Calculation of speed loss for ships operating at heavy sea. *Navigation of China*, 1990, vol. 27, no. 2, pp. 35–40.
16. Kltazawa Takamune, Kuroi Masaaki. Critical speed of container ship in rough sea. *Journal of the Society of naval architects of Japan*. December 1975, no. 138, pp. 269–276.

**For citation:** Wang H., Li P., Xue Yu., Korovkin M. V. Application of improved isochron method in ship's minimum voyage time weather routing. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 286–299. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2017.306

Статья рекомендована к печати проф. Е. И. Веремеем.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2017 г.

Статья принята к печати 8 июня 2017 г.